



Review Article

Biogas Generation from Anaerobic Digestion of High-Content Organic Wastewater

Vo Huu Cong*, Nguyen Duc Canh

Vietnam National University of Agriculture, Trau Quy, Gia Lam, Hanoi, Vietnam

Received 22 July 2023

Revised 04 September 2023; Accepted 14 September 2023

Abstract: Animal husbandry activities, industrial development, along with human activities have led to a generation of high organic content wastewater. These wastewater pose severe environmental issues when the BOD or COD exceeded the limit of national regulation. The conventional treatments of wastewater requires high cost whereas large proportion of nutrients in the forms of carbon, nitrogen, and phosphorus being wasted. In the view of circular economy, these wastewater can be simultaneously treated and recovered as biogas including CH₄, H₂, and N₂. The efficiency of gas recovery is evaluated through the fluctuations in temperature, pH, and nutrients in the treatment tank. The pH in range of 5.5-6.5 shows the most optimal for H₂ production. The maximum threshold of CH₄ gas generation was obtained from pH 7.6-8.3. The efficiency of H₂S gas collection is much higher than that of CH₄ and H₂ but it is not feasible to use because of its high toxicity and odor. The essential factors to evaluate the efficiency of nutrient treatment and the production of H₂ and CH₄ in treatment of three types of wastewater above are the BOD/COD ratio and the BOD:N:P ratio.

Keywords: Anaerobic digestion, biogas, nutrients, organic compounds, wastewater.

* Corresponding author.

E-mail address: vhcong@vnua.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4968>

Thu hồi khí sinh học từ xử lý nước thải giàu hữu cơ bằng hệ thống phân hủy kỵ khí

Võ Hữu Công*, Nguyễn Đức Cảnh

Học viện Nông nghiệp Việt Nam, Trâu Quỳ, Gia Lâm, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 22 tháng 7 năm 2023

Chỉnh sửa ngày 04 tháng 9 năm 2023; Chấp nhận đăng ngày 14 tháng 9 năm 2023

Tóm tắt: Hoạt động chăn nuôi, phát triển các ngành công nghiệp cùng với hoạt động sinh hoạt của con người đã dẫn đến phát sinh nước thải với hàm lượng chất hữu cơ lớn. Trong bối cảnh nền kinh tế tuần hoàn đang phát triển hiện nay, việc sản xuất đi kèm với xử lý chất thải theo truyền thống không khả thi về mặt kinh tế. Phương án thu hồi khí sinh học chủ yếu bao gồm CH_4 , H_2 , N_2 từ xử lý các loại nước thải giàu hữu cơ đã được áp dụng nhằm tận dụng các loại khí phát thải ra ngoài môi trường để làm nhiên liệu đốt, sử dụng làm điện năng. Hiệu quả thu hồi khí được đánh giá thông qua biến động nhiệt độ, pH, dinh dưỡng trong bể xử lý. Ngưỡng pH 5,5 – 6,5 tối ưu nhất để sản sinh H_2 . Ngưỡng sinh khí CH_4 cực đại đạt được từ pH 7,6 – 8,3. Hiệu suất thu khí H_2S đạt được cao hơn hẳn CH_4 và H_2 nhưng không khả thi khi sử dụng vì độ độc và độ mùi cao. Các yếu tố quan trọng để đánh giá hiệu quả xử lý dinh dưỡng và hiệu suất sinh khí H_2 và CH_4 trong chu trình xử lý các loại nước thải là tỷ lệ BOD/COD và BOD:N:P.

Từ khóa: Khí sinh học, dinh dưỡng, hợp chất hữu cơ, nước thải, phân hủy kỵ khí.

1. Mở đầu

Nước thải giàu hữu cơ có tiềm năng thu hồi nguồn khí sinh học rất lớn do trong nó chứa các thành phần dễ phân hủy sinh học, sản phẩm tạo ra chủ yếu là khí methan (CH_4) trong điều kiện yếm khí hoặc cá bô níc (CO_2) trong điều kiện ô xi hóa. Khí methan là một khí sinh học có khả năng sản sinh nhiệt lượng cao. Nước thải có nguồn gốc khác nhau sẽ được áp dụng các công nghệ xử lý và thu hồi khí sinh học khác nhau, phụ thuộc vào thành phần và tính chất của từng loại nước thải đó. Đối với nước thải chăn nuôi, phương pháp được áp dụng rộng rãi đó là xử lý thông qua hệ thống biogas. Do đặc tính giàu hữu cơ [1, 2], tương thích với khả năng phân hủy sinh học cao [1, 3], hệ thống biogas được ứng dụng phổ biến trong lĩnh vực nông nghiệp tuần hoàn

[2, 4, 5] với các phương pháp áp dụng đồng xử lý kết hợp thu hồi khí tại cấp quy mô hộ gia đình tương đối cao [6-11]. Hệ thống biogas hoạt động dựa trên cơ chế phân giải các hợp chất hữu cơ trong điều kiện kỵ khí [12-14]. Cơ chế này chỉ xảy ra khi có sự vắng mặt của khí oxi. Trong môi trường yếm khí, các hợp chất hữu cơ trong nước thải bị phân hủy thành các chất hòa tan và chất khí [13]. Quá trình phân hủy kỵ khí được diễn ra theo nhiều giai đoạn với sự tham gia thiết yếu của protein, tinh bột, axit béo, glyxerol và vi sinh vật [12]. Các sản phẩm khí sinh học chủ yếu được sinh ra bao gồm N_2 , CH_4 , H_2S và một lượng nhỏ khí O_2 và khí CO [14]. Khí sinh học thu hồi đã được ứng dụng làm khí đốt trong các hộ gia đình [6, 15, 16] và nghiên cứu chạy thử nghiệm đối với các loại động cơ [17-20]. Xử lý bằng

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: vhccong@vnua.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4968>

biogas trên quy mô lớn không đạt được hiệu suất xử lý nước thải tối đa, một số phương pháp xử lý sau biogas đã được nghiên cứu và cho thấy hiệu quả xử lý tăng lên đáng kể.

Nước thải sinh hoạt được tạo ra từ các hoạt động sinh hoạt của con người, bắt nguồn chủ yếu từ các hộ gia đình, khu dân cư và đô thị tập trung [21, 22]. Đối với nước thải sinh hoạt đô thị, các phương pháp thường được ưu tiên để xử lý hiện nay là áp dụng công nghệ phản ứng sinh học theo mẻ (Sequencing batch reactor - SBR) và công nghệ sinh học yếm khí ngược dòng qua lớp đệm bùn (Upflow Anaerobic Sludge Blanket – UASB). Quy trình vận hành hệ thống SBR bao gồm 4 giai đoạn liên tục bao gồm: nạp nước thải, xử lý, lắng và rút nước sau xử lý [23]. Ưu điểm của công nghệ SBR là các quá trình xử lý sinh học, bao gồm xử lý BOD (Biochemical oxygen demand), quá trình nitrate hóa, khử nitrate, quá trình phân giải và hấp thụ phosphor đều diễn ra trong một bể xử lý và không cần bể lắng thứ cấp [24]. Tuy nhiên, nhược điểm lại là vận hành phức tạp, nhạy cảm với nhiệt độ và dư thừa bùn [25]. Công nghệ UASB có ưu điểm riêng biệt là xử lý được tất cả các loại nước thải có nồng độ ô nhiễm hữu cơ rất cao, chịu tải trọng lớn [26, 27], thích hợp cho xử lý nước thải sinh hoạt có trộn lẫn với nước thải công nghiệp nhỏ lẻ. Một nghiên cứu ở Úc cho thấy, sử dụng công nghệ này cho lượng khí gas sinh học ở mức 9,8 L/ngày với hàm lượng methan đến 77% [28]. Tuy nhiên nhược điểm công nghệ này là vận hành khá phức tạp và thời gian vận hành lâu [27]. Ngoài ra, ứng dụng hệ thống AAO cũng đạt hiệu quả xử lý tương đối cao đối với nước thải sinh hoạt có hàm lượng BOD₅, COD và N – NH₄⁺ cao [29]. Các công nghệ trên mặc dù đạt được hiệu quả xử lý cao nhưng không thu hồi được dinh dưỡng hữu cơ trong nước thải. Một số nước trên thế giới đã thử nghiệm thu hồi khí từ các hệ thống biogas xử lý nước thải sinh hoạt như ở vùng ven đô thị Zambia [30] hay ở Thụy Điển [31], tuy nhiên rất khó ứng dụng vào thực tế do hiệu suất sản sinh khí thực tế tương đối thấp và các yếu tố môi trường ảnh hưởng đến kết quả sinh khí. Tại Việt Nam cũng chưa áp dụng công nghệ kết hợp xử lý nước thải sinh hoạt và thu hồi khí. Mặc dù đã

có một số nghiên cứu tiếp cận như tiền xử lý bùn bằng phương pháp siêu âm và phân hủy yếm khí bùn kết hợp thu hồi khí [32], tuy nhiên các cơ chế phân giải chất hữu cơ và hiệu suất sản sinh khí vẫn chưa rõ ràng.

Nước thải công nghiệp phát sinh từ các quy trình công nghệ của cơ sở sản xuất, dịch vụ công nghiệp, nhà máy xử lý nước thải tập trung có đầu nổi nước thải của cơ sở công nghiệp [33]. Các loại hình công nghiệp khác nhau có tính chất và đặc trưng riêng về nước thải, do đó các công nghệ xử lý nước thải cũng đặc thù. Công nghệ yếm khí ngược dòng qua lớp đệm bùn (UASB) đã được nghiên cứu xử lý nước thải sản xuất mía đường và có tiềm năng sinh khí CH₄ cao [27]. Nước thải sản xuất tinh bột sắn có hàm lượng COD trên 5600 mg/L và BOD trên 4600 mg/L, áp dụng công nghệ bùn hoạt tính phân hủy kỵ khí – hiệu khí kết hợp vừa để xử lý vừa để thu hồi Biohydrogen [34]. Biohydrogen được đánh giá là nguồn năng lượng sạch, tuy nhiên các công nghệ vẫn được áp dụng trước đây gồm điện phân và cải tạo hơi nước tốn chi phí năng lượng rất cao [35]. Sử dụng Biohydrogen sinh ra từ nước thải chế biến tinh bột sắn tiết kiệm chi phí mua năng lượng và chi phí xử lý nước thải [36].

Cơ chế thu hồi khí sinh học đối với mỗi loại nước thải trên tương đối đa dạng, do đó, việc đánh giá hiệu quả thu hồi đối với mỗi loại khí đều được dựa trên tải trọng nước thải và mức độ, thành phần dinh dưỡng của từng loại. Các phương pháp được đề cập ở trên đều có ưu điểm là hiệu quả xử lý cao và có thể áp dụng đối với nhiều loại hình nước thải khác nhau. Tuy nhiên, tiềm năng sản sinh khí và thu hồi khí vẫn còn chưa được đánh giá rõ ràng. Nghiên cứu này tổng hợp dữ liệu thực nghiệm từ các nghiên cứu về xử lý nước thải kết hợp thu hồi khí trước đây và tổng quan một cách chặt chẽ các cơ chế xử lý và hiệu suất thu hồi khí sinh học đối với 3 loại hình nước thải điển hình là nước thải chăn nuôi; nước thải sinh hoạt và nước thải công nghiệp.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này đánh giá tiềm năng thu hồi khí sinh học từ nước thải giàu chất hữu cơ được

tổng hợp từ các ấn phẩm, công bố khoa học trên tạp chí có uy tín của National Library of Medicine (NLM)'s PubMed (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>), Science Direct (<https://www.sciencedirect.com>), Springer Link (<https://link.springer.com/>), Google Scholar (<https://scholar.google.com/>), và các bài báo đăng trên các tạp chí uy tín, tạp chí chuyên ngành trong nước. Các từ khóa được sử dụng trong tổng hợp gồm: “khí sinh học”, “methan”, “chất hữu cơ”, “nước thải”, “chăn nuôi”, “sinh hoạt”, “kinh tế tuần hoàn”. Kết quả nghiên cứu nhằm cung cấp các luận cứ khoa học về việc thu hồi năng lượng, khí sinh học từ nước thải giàu hữu cơ, làm tiền đề cho các nghiên cứu thu hồi điện năng và khí sinh học.

Phạm vi về đối tượng nghiên cứu của bài báo này tập trung vào các đặc tính dinh dưỡng, cơ chế hoạt động và hiệu suất sản sinh khí CH₄, H₂S, H₂ từ xử lý kỵ khí đối với ba loại hình nước thải (chăn nuôi, sinh hoạt và công nghiệp) giàu hữu cơ. Phạm vi về không gian nghiên cứu bao trùm cả trong nước và quốc tế thông qua tiếp cận hiện trạng áp dụng các công nghệ và thu hồi khí từ các loại nước thải giàu hữu cơ. Nghiên cứu sử dụng phương pháp kê thừa dữ liệu từ hơn 180 bài báo, tạp chí nghiên cứu trong nước và quốc tế, trong vòng 5 năm trở lại (2018 – 2023) trong các lĩnh vực môi trường, nước sạch, chăn nuôi, công nghệ kỹ thuật và công nghệ thực phẩm để đảm bảo đủ dung lượng khoa học cho bài viết tổng quan.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc điểm thành phần nước thải chăn nuôi

Nước thải chăn nuôi đặc thù hơn so với các loại hình nước thải khác. Nước thải chăn nuôi giàu hữu cơ chủ yếu do sự kết hợp của nước tiểu gia súc, phân thải, thức ăn thừa và nước rửa chuồng [2, 37]. Bảng 1 và Bảng 2 cho thấy, nước thải thô chăn nuôi lợn có hàm lượng Nito tổng số (T-N) và COD cao hơn nhiều so với nước thải thô phát sinh từ chăn nuôi bò sữa và các loại hình chăn nuôi khác. Tuy nhiên độ pH trong nước thải thô của chăn nuôi lợn thấp hơn so với nước thải thô của chăn nuôi bò sữa và chăn nuôi khác. Nước thải chăn nuôi lợn hậu bị và lợn đẻ và lợn thịt có hàm lượng COD và BOD₅ rất cao, thường dao động từ 1500 – 1800 (BOD₅) và 2500 – 3000 (COD) [1, 38]; pH thường dao động từ 8,25–8,46 trong khi nước thải chăn nuôi lợn giống các thông số này thấp hơn [38]. Công nghệ khí sinh học (biogas) trong xử lý chất thải chăn nuôi rất tiềm năng trong các công nghệ trong chăn nuôi được áp dụng hiện nay tại Việt Nam và một số quốc gia trên thế giới [39]. Các thông số T-N; COD và pH đặc biệt có liên quan mật thiết đến quá trình phân hủy kỵ khí trong hệ thống biogas [40]. T-N và COD ảnh hưởng thông qua biến đổi về tỷ lệ dinh dưỡng COD:N:P [41, 42], làm thay đổi lượng khí sinh ra. Các bể biogas công suất nhỏ thường không có khả năng phân hủy hết các hợp chất Nito và COD với nồng độ cao, dẫn tới hiệu suất sinh khí không cao [43, 44].

Bảng 1. Đặc tính thành phần một số loại nước thải chăn nuôi tại Việt Nam

Loại hình nước thải chăn nuôi	T – N (mg/L)	T – P (mg/L)	COD (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	N-NH ₄ (mg/L)	pH	TSS (mg/L)	Nguồn tham khảo
Chăn nuôi lợn (thô)	405 ± 1,15	59,3 ± 6,8	3546,9 ± 281	1981,8 ± 168,3	275,53 ± 2,46	7,45 ± 1,72	1274,5 ± 3,70	[1, 7, 38, 40, 45, 46]
Chăn nuôi lợn (sau biogas)	90,72 ± 5,34	17,94 ± 2,63	1639,6 ± 301	709,75 ± 103,8	46,07 ± 2,38	5,98 ± 1,15	301,25 ± 2,02	[1, 47-49]
Chăn nuôi bò (thô)	270,75 ± 14,1	-	470,8 ± 23,55	450,65 ± 24,05	-	7,27 ± 0,4	283 ± 1,12	[2, 50]
Chăn nuôi bò (sau biogas)	124,5 ± 5,6	-	300,12 ± 16,2	118,37 ± 43,01	-	7,305 ± 1,21	99,07 ± 2,31	[2, 50]
Chăn nuôi khác (thô)	157,4 ± 2,12	38,77 ± 3,48	2693,3 ± 121	2857 ± 132,02	60,26 ± 5,42	6,71 ± 0,59	2105,6 ± 15,4	[51, 52]
Chăn nuôi khác (sau biogas)	104,8 ± 6,78	27,8 ± 5,64	230,2 ± 10,65	128,8 ± 4,33	25,03 ± 5,52	6,4 ± 1,17	80 ± 2,76	[51, 52]

Thông số pH ảnh hưởng đến sự thay đổi nồng độ nitrat trong nước thải [45]. Bên cạnh đó, yếu tố hoạt động của hệ vi sinh vật yếm khí đóng một vai trò quan trọng trong việc sản sinh khí methan và phụ thuộc vào thay đổi pH. Vi khuẩn axetat và sinh methan là các vi sinh kỵ khí nghiêm ngặt (môi trường không có Oxy), chỉ sinh trưởng với điều kiện pH >6,2 (tối ưu ở

khoảng pH 7,0-7,5) [12]. Nhóm vi sinh vật này hoạt động cũng giải phóng Nito và Photpho nguyên tử thành dạng NH⁴⁺-N và PO₄³⁻-P nhưng không ảnh hưởng nhiều đến hiệu quả sinh khí [37]. Chính cơ chế này đã làm cho nước thải chăn nuôi lợn sau biogas thường ít có mùi hôi thối hơn so với nước thải đầu vào [7].

Bảng 2. Đặc tính các thành phần của nước thải chăn nuôi thô tại một số quốc gia trên thế giới

Loại hình nước thải	COD (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	pH	Nguồn tham khảo	Quốc gia
Chăn nuôi lợn	3396,25 ± 307,6	654,25 ± 105,08	736 ± 46,42	171 ± 28,17	6,3 ± 2,05	[53-56]	Mexico
	4517,25 ± 389,51	845,75 ± 79,403	658,75 ± 54,6	342,99 ± 62,3	6,2 ± 1,1	[57-59]	China
	4133,75 ± 609,7	536,5 ± 179,23	695,5 ± 83,3	186,75 ± 65,1	7,3 ± 2,41	[60-62]	South Korea
	5150 ± 679,21	688,5 ± 150,04	633,02 ± 75,3	235 ± 66,85	8,1 ± 2,12	[63-65]	Italy
Chăn nuôi gia súc lấy sữa	1733,75 ± 78,89	316 ± 31,12	493,25 ± 91,6	-	6,5 ± 1,03	[66-68]	Japan
	2626 ± 57,86	224,25 ± 26,9	315,5 ± 21,14	-	6,7 ± 0,54	[69, 70]	New Zealand
	3779,75 ± 566,9	-	-	93,2 ± 12,05	7,4 ± 2,14	[71, 72]	Pakistan

3.2. Đặc điểm thành phần nước thải sinh hoạt

Bảng 3 cho thấy, đối với hai dòng thải sinh hoạt đặc thù là nước thải đen và nước thải xám, các thông số COD, TSS và T-N tương đối cao so với nước thải sinh hoạt thông thường tại khu đô thị và nông thôn. Đặc biệt COD có thể lên tới hơn 8000 mg/L ở nước thải đen. pH dao động từ 6-7 đối với nước thải sinh hoạt đô thị và nông thôn nhưng có thể lên mức 8 đối với nước thải sinh hoạt hỗn hợp. Nước thải sinh hoạt hỗn hợp trong trường hợp này có trộn lẫn nước mưa và nước thải từ các khu công nghiệp nhỏ lẻ khác, COD dao động tới hơn 200 mg/L. Các thông số có liên quan mật thiết đến quá trình phân hủy kỵ khí trong nước thải sinh hoạt là BOD₅, COD, T-N, T-P và pH [40]. BOD₅ ảnh hưởng thông qua tỷ lệ hồi lưu của nước trong các hệ thống xử lý và tỷ lệ BOD/COD; BOD:N:P [41, 42]. Thông số pH có ảnh hưởng đồng thời lên quá trình phân hủy kỵ khí và hiệu suất sản sinh khí của nước

thải sinh hoạt giàu hữu cơ [12]. Yếu tố nhiệt độ được đánh giá là quan trọng và ảnh hưởng lớn tới hiệu suất thu hồi khí sinh học. Nhiệt độ làm biến động động sinh khí theo thời gian, đặc biệt là khí methan. Mặc dù các công nghệ xử lý nước thải sinh hoạt hiện nay rất đa dạng, xử lý kỵ khí vẫn là công nghệ tiềm năng. A. G. Capodaglio [73] đã nhận định rằng nước thải đen phù hợp với phương pháp xử lý kỵ khí để có thể thu hồi được năng lượng dưới dạng khí sinh học và dinh dưỡng. Tuy nhiên, các công nghệ xử lý nước thải sinh hoạt bằng phương pháp hiếu khí và kỵ khí đều có chi phí cao và vận hành phức tạp [25]. Một số phương pháp xử lý sinh học khác đã được kết hợp đem lại hiệu quả đồng xử lý cao như sử dụng vật liệu lọc, lọc sinh học nhỏ giọt [74]. Bảng 4 cho thấy hiệu quả giảm kim loại nặng trong nước thông qua phương pháp lọc chậm bằng cát. Phương pháp giúp loại bỏ chủ yếu các kim loại nặng bao gồm Asen (As), Đồng (Cu), Chì (Pb) và Cadimium (Cd). Có thể thấy hiệu

quả loại bỏ As V và Pb đạt tới ngưỡng 100% theo một nghiên cứu của Y. Zhang và cộng sự [75]. Xử lý bằng phương pháp này đạt hiệu quả cao đối với nguồn thải có chứa hàm lượng kim loại nặng hoặc TSS cao và tiềm năng thu hồi tài

nguyên thấp. Đối với các nguồn thải có BOD₅, COD và TSS cao, việc kết hợp phương pháp lọc nhỏ giọt và hệ thống biogas sẽ đạt được hiệu quả xử lý và thu hồi khí sinh học cao.

Bảng 3. Đặc tính thành phần nước thải sinh hoạt chưa qua xử lý tại Việt Nam và một số quốc gia khác

Quốc gia	Loại NTSH	pH	BOD ₅ (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Nguồn tham khảo
Việt Nam	NTSH đô thị	6,87 ± 0,29	209,8 ± 6,35	162,7 ± 34,8	204,2 ± 3,94	-	-	[76, 77]
	NTSH nông thôn	7,07 ± 0,83	188,8 ± 11,8	-	191,8 ± 6,21	-	-	[25, 78]
	NTSH hỗn hợp	7,41 ± 0,48	85,67 ± 9,35	212,3 ± 21,4	149,7 ± 7,32	112,01 ± 32,2	23,3 ± 2,6	[52, 79]
Một số quốc gia khác	Nước thải đen	-	-	8164,02 ± 1604,3	12651,31 ± 5324,5	4596,09 ± 480,25	3202,05 ± 124,6	[80-83]
	Nước thải xám	-	-	422,9 ± 24,93	749,06 ± 68,1	21,7 ± 2,7	7,95 ± 0,47	[80-84]

Bảng 4. Hiệu quả loại bỏ một số kim loại nặng trong nước bằng phương pháp lọc cát chậm

Chất ô nhiễm	Hiệu quả loại bỏ (%)	Nguồn tham khảo
As III	98,5 ± 0,25	[75, 85-87]
As V	99,8 ± 0,015	[75, 85-87]
Đồng	97,3 ± 1,34	[75, 85-87]
Chì	98,1 ± 0,68	[75, 85-87]
Cadmium	96,3 ± 0,02	[75, 85-87]

3.3. Đặc điểm thành phần nước thải công nghiệp

Trong các ngành công nghiệp hiện nay, có bốn ngành công nghiệp đại diện, đặc thù có mức độ phát sinh chất hữu cơ và dinh dưỡng tương đối cao là dệt nhuộm; sản xuất mía đường; sản xuất giấy và thuộc da. Bảng 5 cho thấy, các loại hình nước thải này có chỉ số pH cao (7-8,5) và độ màu cao (hơn 645 P_t-C_o). Hai thông số đặc trưng là BOD (lên tới hơn 1200 mg/L) và COD (lên tới hơn 3200 mg/L) ở sản xuất giấy. Tại Việt Nam, ngành công nghiệp dệt nhuộm thường sử dụng nhiều nước và hóa chất tẩy trắng, chất tẩy nên nồng độ COD và độ màu thường ở mức rất cao [88]. Bảng 6 cho thấy, một số ngành công nghiệp nặng tại một số quốc gia bao gồm luyện

kim, lọc hóa dầu có thành phần trong nước thải chủ yếu là kim loại nặng (Cadmium, Crom). Các ngành công nghiệp hóa chất, thuộc da có mức độ ô nhiễm tương đối nặng [89], do thành phần nước thải có chứa các loại axit phát sinh từ quá trình sơ chế, tẩy rửa. Các thông số có liên quan mật thiết đến quá trình phân hủy kỵ khí nước thải các ngành công nghiệp đặc thù là BOD; COD; T-N; pH. Tương tự nước thải sinh hoạt và nước thải chăn nuôi, các thông số quan trọng trên ảnh hưởng đến việc thay đổi tỷ lệ BOD/COD; BOD:N:P và COD:N:P có trong hệ thống xử lý dinh dưỡng và các yếu tố nhiệt độ, pH đóng vai trò quan trọng trong đánh giá hiệu suất thu hồi khí sinh học, đặc biệt là hydro sinh học và khí methan.

Bảng 5. Đặc tính nước thải chưa qua xử lý của một số ngành công nghiệp đặc thù ở Việt Nam

Ngành công nghiệp	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	TSS (mg/L)	Độ màu (Pt-Co)	Nguồn tham khảo
Mía đường	7,2 ± 0,5	970,2 ± 160,6	1196,5 ± 262,8	-	-	710,5 ± 85,32	-	[13, 27]
Dệt nhuộm	8,5 ± 0,4	-	989,06 ± 12,81	-	-	455,4 ± 59,5	645 ± 87,4	[88, 90, 91]
Giấy	7,3 ± 0,25	1205 ± 420	3250 ± 840	5,6 ± 1,25	3,5 ± 0,21	-	-	[92, 93]
Thuộc da	8,5 ± 1,2	2860 ± 30	3403 ± 1143	-	526 ± 105	-	-	[94, 95]

Bảng 6. Thành phần ô nhiễm chính từ nước thải của một số ngành công nghiệp

Chất gây ô nhiễm chính trong nước thải	Hoạt động công nghiệp có xả nước thải
Nước axit	Công nghiệp hóa chất; khai thác mỏ; dệt nhuộm.
Cadimi, crom	Xi, mạ kim loại; luyện kim; thuộc da.
Đồng	Mạ đồng; tẩy rửa đồng.
Xyanua	Sản xuất khí gas công nghiệp; xi, mạ kim loại; tẩy rửa kim loại.
Hydrocacbon; dầu khoáng; phenol; crom	Lọc hóa dầu; khai thác và chế biến dầu; sản xuất cao su.
Tinh bột	Công nghiệp thực phẩm; dệt may.
Sunfua; sunfat; crom	Công nghiệp dệt may, thuộc da, sản xuất khí đốt.
Axit tartaric	Dệt nhuộm; thuộc da; sản xuất hóa chất.

Nguồn: Sabah Mohamed Abdelbasi and Ahmed Esmail Shalan [89].

Do đặc trưng về nhiệt độ và hàm lượng hóa chất trong nước thải cao nên nước thải dệt nhuộm không thể xử lý bằng công nghệ sinh học. Nước thải ngành công nghiệp sản xuất giấy có đặc trưng bởi hàm lượng TSS, BOD, COD cao [96, 97]. Quá trình xử lý nước thải sản xuất giấy được chia thành 3 giai đoạn: xử lý sơ bộ, xử lý yếm khí và xử lý hiếu khí [97].

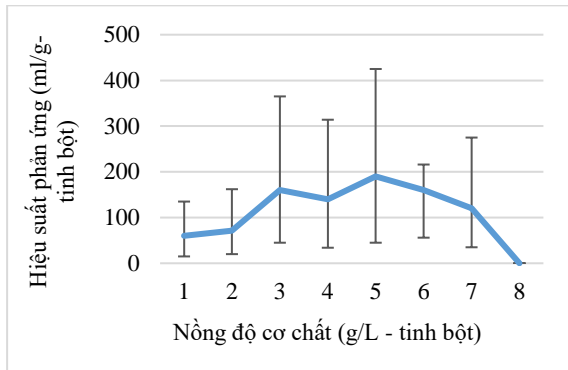
3.4. Yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả sinh khí sinh học

3.4.1. Nồng độ cơ chất

Đối với nước thải chăn nuôi, hiệu quả sinh khí cao hơn khi tăng nồng độ cơ chất [98, 99]. Quá trình phân hủy kỵ khí của nước thải chăn nuôi lợn và nước thải chăn nuôi bò thường có sự biến động nồng độ cơ chất cao [100]. Khi tăng nồng độ cơ chất lên mức bão hòa, sản lượng sinh khí CH₄ bắt đầu giảm xuống và không thay đổi khi tiếp tục thêm vào [100, 101]. Nghiên cứu của Nima Norouzi and Hossein Khajehpour [100] cho thấy khi thêm nồng độ cơ chất lên 61,1 g/L, lượng khí CH₄ sinh ra là 29,10 g/L, con số này

không thay đổi khi tăng thêm lượng cơ chất là 74,51 g/L. Đối với nước thải sinh hoạt, nồng độ cơ chất dao động từ 1 g/L đến 8 g/L [35]. Hiệu suất sản sinh khí H₂ tăng lên khi nồng độ cơ chất tinh bột trong nước thải tăng từ 1g/L đến 5 g/L (Hình 1). Tuy nhiên, lượng khí H₂ sản sinh thực tế giảm khi nồng độ tinh bột tăng từ 5 g/L đến 7 g/L. Sự sụt giảm lượng H₂ ở ngưỡng nồng độ tinh bột cao làm tăng Vass tổng dẫn đến giảm nhanh pH và ức chế sản sinh H₂. Khi nồng độ cơ chất không đủ, lượng khí CH₄ sản sinh ra sẽ rất thấp [102]. Hiệu suất sản sinh khí còn phụ thuộc vào lượng COD và sunfat có trong nước thải. Hơn 50% methan hòa tan (dissolved methane) trong tổng lượng methan sinh ra mất đi do biến động hàm lượng COD trong nước thải [103, 104]. Đối với nước thải công nghiệp, đặc biệt là nước thải ngành công nghiệp giấy, hiệu suất sinh khí methan và hydro cũng tăng lên khi bổ sung thêm cơ chất ở một ngưỡng nhất định [105]. Đồng thời bổ sung cơ chất lần lượt là 3 g-COD/L và 5 g-COD/L và điều chỉnh pH ở ngưỡng 5-7, sản lượng hydro tối đa thu được ở pH ban đầu 5, sau đó giảm xuống khi tiếp tục

thêm cơ chất và pH không đổi. Hiệu suất hydro tối ưu là 38,8 mL H₂/g-COD ban đầu thu được ở nồng độ cơ chất là 5 g-COD/L ở 55 °C [105].



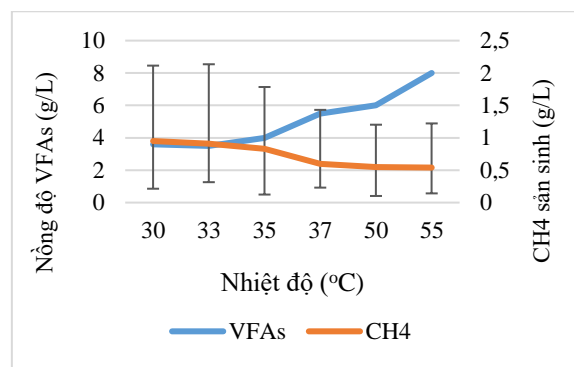
Hình 1. Biến động hiệu suất sản sinh khí H₂ theo nồng độ cơ chất (tinh bột). Ilgi Karapinar Kapdan and Fikret Kargi [35].

3.4.2. Hệ vi sinh vật

Đối với nước thải chăn nuôi, nước thải sinh hoạt và nước thải công nghiệp, hệ vi sinh vật có ảnh hưởng quan trọng tới hiệu quả sản sinh khí methan trong phức hợp hệ thống phân hủy kỵ khí. Một số tập đoàn vi khuẩn có ảnh hưởng mạnh tới hiệu quả sinh khí CH₄ trong các loại nước thải chăn nuôi gồm: vi khuẩn thủy phân: thường có dạng hình que, nhuộm Gram dương hoặc Gram âm, thực hiện chức năng cắt cao phân tử cacbohydrat và protein đơn giản thành đường đơn và axit amin. Đại diện cho nhóm vi khuẩn thủy phân này là *Anaerovibrio lipolytica*, chịu chức năng thủy phân lipid trong điều kiện kỵ khí. Các vi khuẩn thủy phân trong nước thải sinh hoạt sinh trưởng tốt nhất ở môi trường pH (5-8). Vi khuẩn tạo axit: cấu tạo bởi vi khuẩn acetogenic, trực tiếp tạo thành VFAs (axit béo dễ bay hơi). Vi khuẩn tạo axit với vi khuẩn lên men không cùng chung chức năng phân hủy chất béo. Khả năng sản sinh enzyme ngoại bào đặc trưng cho vi khuẩn tạo axit phù hợp với các loại cơ chất khác nhau. Sự thành công trong việc sản xuất hydro sinh học từ nước thải công nghiệp thông qua quy trình lên men phụ thuộc rất nhiều vào các chủng vi sinh vật trong đó có vi khuẩn đồng loại, tạo thành axetat từ CO₂ và H₂ và vi khuẩn hydrogenogenic, chuyển đổi axit béo dễ bay hơi

thành axetat và H₂. Vi khuẩn *Thermoanerobacterium sp.* có khả năng sản sinh hydro trong quá trình lên men sẫm màu ở 60 °C. Vi khuẩn methanogenic, cấu tạo từ các methanogens, chuyển đổi CO₂ và H₂ thành methan (CH₄). Nhóm vi khuẩn này sinh trưởng được ở điều kiện nhiệt độ cao (65-80 °C), dễ dàng phát hiện được dưới kính hiển vi do có khả năng phát quang ở bước sóng tia tử ngoại. Thời gian thế hệ duy trì từ (1-3) ngày ở nhiệt độ 35-55 °C.

3.4.3. Nhiệt độ



Hình 2. Ảnh hưởng của biến động nhiệt độ tới thay đổi nồng độ VFAs và hàm lượng khí CH₄ sinh ra. (Pooria Latifi và cộng sự [101]).

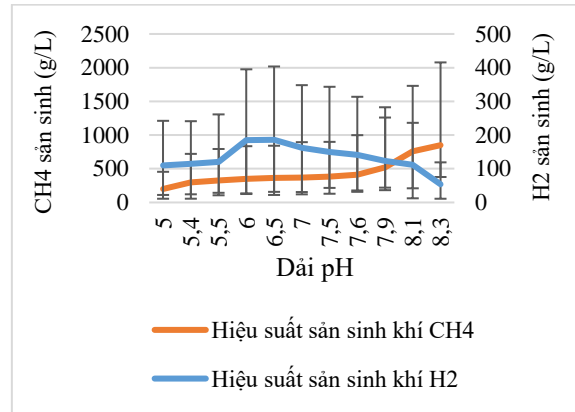
Nhiệt độ là một trong những yếu tố quyết định đến chất lượng các loại nước thải chăn nuôi, sinh hoạt và công nghiệp sau xử lý và hiệu quả sản sinh các loại khí theo các giai đoạn [106-109]. Đối với nước thải chăn nuôi, việc nhiệt độ môi trường giảm tới khoảng 25 °C trong các bể xử lý kết hợp với tăng nồng độ cơ chất có thể gây ra sự chênh lệch tới 80% hàm lượng khí sinh ra [106]. Đối với nước thải sinh hoạt, tiềm năng sản sinh khí methan sinh học tốt nhất là ở nhiệt độ môi trường trung bình khoảng 35 ± 1 °C [110, 111]. Khi ngưỡng nhiệt độ này quá cao hoặc quá thấp sẽ ức chế hoạt động của các nhóm vi sinh vật ưa nhiệt độ trung bình, làm giảm khả năng sinh khí. Nhiệt độ ảnh hưởng tới hiệu suất sinh khí CH₄ trong nước thải ngành công nghiệp thực phẩm thông qua biến động hàm lượng axit béo dễ bay hơi (VFAs). Trong khoảng nhiệt độ từ 30-37 °C, nồng độ VFAs dao động từ 3,6-5,5 g/L (Hình 2). Từ 37-50 °C, VFAs tiếp tục tăng đến

6,0 g/L. Tuy nhiên, khi VFAs tăng thì lượng CH₄ lại giảm từ 0,95-0,54 g/L. Như vậy có thể kết luận rằng, khi nhiệt độ thay đổi sẽ ảnh hưởng lớn đến CH₄ sinh ra. Sản sinh hydro nhờ các nhóm vi sinh vật thông qua quá trình lên men phụ thuộc rất nhiều vào điều kiện nhiệt độ của quá trình [112]. Các vi sinh vật trung tính có năng suất tối ưu ở nhiệt độ từ 30-40 °C cho các quá trình sản sinh hydro [113]. Có thể tăng năng suất sinh khí Hydro bằng cách vận hành ở nhiệt độ cao do nhiệt động lực học được tăng cường, nhưng sinh khối và nhiệt năng sinh học có thể dẫn đến hiệu suất thấp.

3.4.4. Giá trị pH

Việc thay đổi giá trị pH trong các khoảng khác nhau có ảnh hưởng mạnh mẽ tới hoạt động của các chủng vi sinh vật tương thích và hàm lượng nitrat trong nước thải chăn nuôi, sinh hoạt và công nghiệp đặc thù [21, 45, 114, 115]. Điều này dẫn tới những biến đổi về lượng khí thu hồi được sau xử lý kỵ khí. Đối với nước thải chăn nuôi, pH ảnh hưởng trực tiếp tới sự phân bố các dạng amoniac (NH₄⁺/NH₃), tăng pH lên ngưỡng 11 dẫn đến việc chuyển đổi hầu hết các ion amoni (NH₄⁺) thành khí amoniac hòa tan (NH₃) [115]. Đối với nước thải sinh hoạt, việc điều chỉnh pH dẫn tới thay đổi về phục hồi sinh khối và sản sinh khí hydro sinh học [116]. Điều này cũng xảy ra tương tự đối với một số loại nước thải công nghiệp. Khi tiến hành thí nghiệm lên men kỵ khí hàng loạt để chuyển hóa tinh bột thành H₂ tại các dải pH khác nhau trong nước thải một số ngành công nghiệp đặc thù, H₂ được tạo ra ở khoảng pH dao động từ 5 – 7,5. Hiệu suất tạo H₂ sau đó tăng từ pH 5 – 6,5 và giảm trong khoảng pH 6,5 – 7,5 (Hình 3). Khi pH dưới 5,0 H₂ không được tạo ra do vi khuẩn sản sinh hydro bị ức chế ở pH thấp. Trong điều kiện này, nhiều axit béo dễ bay hơi (VFAs) được tích tụ [36]. Do đó, ngưỡng pH 5,5 – 6,5 là tối ưu nhất để H₂ được sinh ra. Khí CH₄ được tạo ra trong khoảng pH 5,0 – 8,3. Hiệu suất sản sinh CH₄ có xu hướng tăng khi pH tăng cao. Ngưỡng sinh khí methan cực đại đạt được từ pH 7,6 – 8,3. Các chất hữu cơ khó phân hủy như lignin trong nước thải bột giấy, cellulose trong nước thải tinh bột

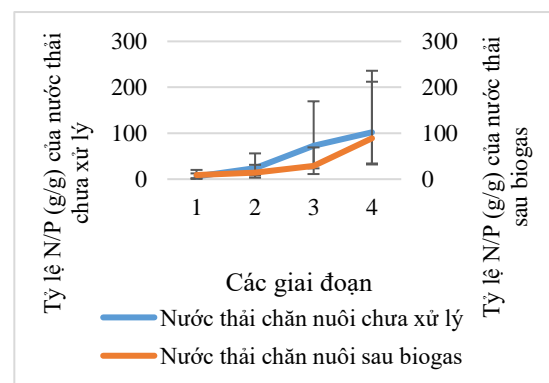
sẽ ảnh hưởng đến sản sinh khí CH₄ [117]. Giá trị pH dưới 5,0 sẽ cản trở sinh khí CH₄ kéo dài.



Hình 3. Ảnh hưởng của biến động pH tới hiệu suất sản sinh khí H₂ và CH₄ ([36], Tran Sy Nam, et al., [118]).

3.4.5. Yếu tố dinh dưỡng

Đối với các loại nước thải chăn nuôi, nước thải sinh hoạt và nước thải công nghiệp đặc thù, các yếu tố dinh dưỡng về Nitơ và Photpho có ý nghĩa quan trọng trong việc tăng hiệu suất xử lý và thu hồi khí sinh học theo các giai đoạn [119-121]. Trong xử lý nước thải sinh hoạt, việc điều chỉnh tỷ lệ N/P để đạt được hiệu suất thu hồi khí cao có thể đạt được bằng cách thay đổi các điều kiện khác nhau, chẳng hạn như việc bổ sung chất xúc tác phản ứng hạn chế để hình thành khoáng chất chứa N và P [122].



Hình 4. Biến động tỷ lệ N/P đối với nước thải chăn nuôi theo các giai đoạn. (M. Hjorth et al., [123]).

Tỷ lệ N/P (g/g) của nước thải chăn nuôi chưa được xử lý tăng từ 6-24 trong giai đoạn đầu và đạt cực đại là 102 ở giai đoạn cuối của quá trình chăn nuôi (Hình 4). So sánh giữa nước thải chưa xử lý với nước thải sau biogas ta thấy ở giai đoạn đầu của quá trình xử lý, hiệu suất xử lý chưa cao, độ chênh lệch về tỷ lệ N/P (g/g) của giai đoạn 1 và giai đoạn 2 là 5. Tuy nhiên, các giai đoạn sau, hiệu suất xử lý tăng lên đáng kể, chênh lệch về tỷ lệ N/P (g/g) của 2 giai đoạn cuối đạt cao nhất là 60. Sự thay đổi tỷ lệ N/P ảnh hưởng rất lớn tới hiệu quả xử lý và thu hồi dinh dưỡng trong nước thải chăn nuôi. Đối với nước thải công nghiệp có hàm lượng dinh dưỡng cao như công nghiệp sản xuất sữa, phạm vi tương thích của tỷ lệ N/P phụ thuộc vào các loại vi khuẩn phân giải khác nhau,

nhưng hầu hết vi khuẩn lam có thể tương thích với tỷ lệ N/P thấp để dễ dàng phân giải dinh dưỡng có trong nước thải.

3.4.6. Tỷ lệ BOD:N:P

Các tỷ lệ BOD:N:P được chọn tương thích lần lượt là 100:0:0,5; 100:1,3:0,5; 100:1,8:0,6; 100:2,7:0,6; 100:4,9:0,5. Tỷ lệ BOD:N:P (100:5:1) thường được sử dụng như tiêu chuẩn cho việc bổ sung dinh dưỡng trong các nước thải nghèo dinh dưỡng, bằng việc cố định Photpho, điều chỉnh hàm lượng Nito [124]. Hàm lượng Nito không ảnh hưởng tới việc loại bỏ cacbon hữu cơ, nhưng có ảnh hưởng mạnh mẽ tới cấu trúc biofloc [125].

Bảng 7. Tỷ lệ BOD:N:P trong phản ứng loại carbon

Phản ứng	Nồng độ P (mg/L)	Nồng độ N (mg/L)	BOD:N:P	Nguồn
1	0,92 ± 0,02	0,07 ± 0,008	100:0:0,5	[124, 126, 127]
2	0,94 ± 0,016	2,24 ± 0,02	100:1,3:0,5	[124, 126, 127]
3	1,012 ± 0,06	3,12 ± 0,017	100:1,8:0,6	[124, 126, 127]
4	0,997 ± 0,03	4,58 ± 0,08	100:2,7:0,6	[124, 126, 127]
5	0,955 ± 0,02	8,66 ± 0,107	100:4,9:0,5	[124, 126, 127]

3.4.7. Tỷ lệ BOD:COD

Anwar Ahmad [128] đánh giá được tỷ lệ BOD:COD giảm từ 0,871 xuống 0,110 với hiệu suất methan trung bình là 0,98 ml CH₄/g-COD đã bị loại bỏ và 95% COD bị loại bỏ được chuyển thành khí methan 5 g/L⁻¹ do tác động bổ sung của các yếu tố nhiệt độ và pH môi trường làm cho phản ứng phân giải và chuyển hóa xảy ra nhanh hơn. Tỷ lệ sản sinh khí sinh học đặc biệt là khí CH₄ tại các bể phản ứng kỵ khí ở mức trung bình (0,944 mL/g-COD bị loại bỏ). Hiệu

suất sinh khí CH₄ bị ảnh hưởng rất lớn bởi việc bổ sung thêm O₃. Tỷ lệ BOD:COD còn được xem là một dấu hiệu đánh dấu mức độ biến đổi Nito, mức độ khoáng hóa các hợp chất hữu cơ và tối ưu hóa các thông số động học của các phản ứng sinh học và hóa học trong xử lý nước thải [129]. Đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ BOD:COD tới hiệu suất sản sinh khí Methan dựa trên mức độ thay đổi của nồng độ cơ chất có hiệu quả tương đối cao và phù hợp với các điều kiện thí nghiệm khác.

Bảng 8. Ảnh hưởng của tỷ lệ BOD/COD đến hiệu suất phản ứng

Thời gian ozone hóa	MLSS*	BOD	BOD/COD	Nguồn
40 h	15005 ± 5,77	25025 ± 28,86	0,5	[42, 128, 130]
50 h	23002 ± 4,85	17020 ± 24,49	0,4	[42, 128, 130]
60 h	32003 ± 2,58	11025 ± 20,81	0,2	[42, 128, 130]
70 h	40505 ± 5,77	14030 ± 22,73	0,1	[42, 128, 130]
Không xảy ra ozone hóa	1010 ± 8,16	27015 ± 17,8	0,5	[42, 128, 130]

3.5. Các sản phẩm thu hồi khí sinh học

3.5.1. Thu hồi khí sinh học dạng nhiệt

Bảng 9 cho thấy, lượng khí CH₄ sinh ra có xu hướng tăng từ ngày thứ 5 đến ngày thứ 125. Lượng H₂S sinh ra trong quá trình xử lý có sự biến động liên tục. Điều này phụ thuộc vào tính chất của từng loại nước thải khác nhau. Quá trình phân hủy kỵ khí nước thải sinh hoạt theo lý thuyết tạo ra 70 – 80% khí methan [102], tuy nhiên lượng methan sản sinh thực tế thấp hơn rất nhiều so với lý thuyết. Hydro sulfur (H₂S) được

tạo ra trong môi trường yếm khí chủ yếu bằng cách khử sulfat [131]. Sulfat có thể tồn tại trong nước thải đô thị do sự thu thập nước thải công nghiệp giàu anion sulfat. H₂S là khí gây mùi khó chịu trong các loại khí sinh học sản sinh từ quá trình sinh học yếm khí. Độ mùi của H₂S phụ thuộc vào độ pH của nước thải. H₂S là hợp chất nguy hiểm, dễ cháy và rất độc. Có thể cảm thấy sự xuất hiện của H₂S trong không khí ở nồng độ 0,02 – 0,03 ppm. Điều này phụ thuộc và tính chất của từng loại nước thải khác nhau

Bảng 9. Hiệu quả thu hồi khí sinh học dạng nhiệt

STT	Thời gian	(%) CH ₄ trước xử lý	(%) CH ₄ sau xử lý	V - H ₂ S trước xử lý (ppm)	V - H ₂ S sau xử lý (ppm)	Nguồn tham khảo
1	Sau 5 ngày	65,57 ± 0,38	86,70 ± 0,63	2671,7 ± 37,6	674,75 ± 11,52	[40]
2	Sau 38 ngày	64,60 ± 0,49	89,07 ± 0,67	2122,5 ± 108,1	599,5 ± 11,38	[40, 131, 132]
3	Sau 50 ngày	63,62 ± 1,12	70,45 ± 0,28	1445,5 ± 53,04	1574,5 ± 40,50	[131]
4	Sau 70 ngày	65,50 ± 0,60	70,52 ± 0,22	-	-	[133, 134]
5	Sau 90 ngày	66,27 ± 0,79	84,25 ± 0,12	1918,75 ± 44,3	522,25 ± 23,66	[40, 67]
6	Sau 125 ngày	64,02 ± 0,55	81,67 ± 0,59	1378,25 ± 31,5	575,25 ± 17,85	[40, 135]

3.5.2. Thu hồi khí sinh học dạng điện năng

Bảng 10 cho thấy, lượng Hydro (H₂) sinh ra tăng dần trong 17 giờ đầu (khoảng 0-2,5 ml) và tiếp tục tăng nhanh trong 4 giờ sau (khoảng 2,5-22,5 ml). Trong 2 giờ sau đó, nồng độ H₂ sinh ra bắt đầu giảm xuống 15 ml và còn 8,5 ml sau 25 giờ. Tăng tỷ lệ pha loãng mẫu nước thải (DR) từ 1:2 lên 1:3 đã làm tăng hiệu suất sản sinh H₂ từ 116,5 ± 76 lên 142,5 ± 54 ml H₂/g COD loại bỏ [136]. Khi DR tăng từ 1:4, H₂ giảm xuống còn 114,5 ± 65 ml H₂/g COD loại bỏ. Khi thời

gian lưu của bùn trong ngày (SRT) tăng từ 3,6 lên 4,0, lượng H₂ sinh ra tăng từ 83 ± 37 lên 95 ± 24 ml H₂/g COD loại bỏ. Quá trình lên men hydro tạo điều kiện cho hiệu quả loại bỏ carbohydrate, lipid, protein và chất rắn bay hơi [36]. Hiệu suất sản sinh khí hydro tăng khi xem xét đối với nước thải của nhà máy chưng cất vì hàm lượng đường và hiệu suất năng lượng rỗng cao [113]. Quá trình phân hủy kỵ khí hai giai đoạn còn có tiềm năng đạt được hiệu quả thu hồi năng lượng và khí H₂ sinh học tối ưu hơn so với phân hủy kỵ khí một giai đoạn [113].

Bảng 10. Hiệu quả thu hồi khí dạng điện năng

Thời gian	Thu hồi khí dạng điện năng		Nguồn tham khảo
	H ₂ (ml/h) trước xử lý	H ₂ (mL/h) Sau xử lý	
15 h-17 h	0	2,36 ± 0,32	[36, 137]
17 h-20 h	2,37 ± 0,18	7,34 ± 0,17	[137, 138]
20 h-21 h	7,36 ± 0,103	22,65 ± 0,23	[116, 137]
21 h-23 h	22,71 ± 0,24	15,22 ± 0,26	[137, 139]
23 h-24 h	15,37 ± 0,22	12,71 ± 0,16	[137, 140]
24 h-25 h	12,76 ± 0,14	8,72 ± 0,16	[137, 141]

4. Kết luận

Đặc trưng của các loại nước thải giàu hữu cơ là hàm lượng COD, BOD₅ và Nito tổng số tương đối cao. Do đó, tiềm năng thu hồi khí sinh học từ phân hủy kỵ khí nước thải giàu hữu cơ cũng vô cùng lớn. Tuy nhiên hiệu quả sản sinh và lượng khí thu hồi được từ quá trình phân hủy yếm khí được đánh giá vẫn còn thấp (điển hình là khí CH₄) và bị ảnh hưởng rất lớn bởi các điều kiện pH, nồng độ cơ chất, khu hệ vi sinh vật đặc trưng và nhiệt động học. Đề xuất nghiên cứu về ảnh hưởng của các chủng loại vi sinh vật tới hiệu suất sản sinh khí trong các điều kiện pH môi trường và nồng độ cơ chất khác nhau để đánh giá hiệu quả thu hồi tài nguyên của các loại nước thải giàu hữu cơ khác.

Lời cảm ơn

Tác giả cảm ơn Quỹ Nafosted (MS:105.08-2018.312) tài trợ về mặt kinh phí cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] N. D. Ba, N. T. Q. Hung, B. T. C. Nhi, N. K. Hue, V. M. Sang, L. T. L. Thao, D. Q. Tri, N. M. Ky, Auditing Piggery Waste at the Farms in Loc Ninh District, Binh Phuoc Province, Vietnam Journal of Hydrometeorology, Vol. 744, 2022, pp. 17-27, [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022\(744\).17-27](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022(744).17-27) (in Vietnamese).
- [2] V. H. Cong, P. T. Hang, Waste Audit of Cattle Production in Minh Chau Commune, Ba Vi District, Hanoi, TNU Journal of Science and Technology, Vol. 207, 2019, pp. 129-134 (in Vietnamese).
- [3] P. D. Thanh, N. M. T. Chinh, P. T. N. Han, P. L. T. Hang, N. L. Huong, Biofilm Attached Cultivation of *Spirulina Platensis* under Light- Emitting Diodes (Led) for Anaerobically Digested Piggery Wastewater, Journal of Food Science and Technology, Vol. 22, No. 4, 2022, pp. 105-114 (in Vietnamese).
- [4] P. M. Hen, N. V. Thanh, V. H. Cong, Circular Economy Approach in Agricultural Wastes Management: A Case Study in Minh Chau Commune, Ba Vi, Hanoi, TNU Journal of Science and Technology, Vol. 226, 2021, pp. 100-107, <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4335> (in Vietnamese).
- [5] N. T. T. Linh, T. H. Long, N. T. Thu, Circular Economic Development in Agriculture to Sustainable Development in Hai Phong, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 71, 2022, pp. 99-102 (in Vietnamese).
- [6] D. N. Thang, T. B. Hong, Estimating Benefits of Biogas Application in Binh Luc District, Ha Nam Province, Journal of Economics and Development, Vol. 198, 2013, pp. 71-79 (in Vietnamese).
- [7] N. T. Hong, P. K. Lieu, Evaluation of the Efficiency of Pig Farming Wastewater Treatment by Household-Scale Biogas in Thua Thien Hue, Hue University Journal of Science, Vol. 73, 2012, pp. 83-91 (in Vietnamese).
- [8] N. T. K. Anh, Study on Multi-Benefit Assessment Method in Pig Farming Wastewater Treatment by Biogas System, Environmental Science Institute, 2021 (in Vietnamese).
- [9] J. Piekutin, M. Puchlik, M. Haczykowski, K. Dyczewska, The Efficiency of the Biogas Plant Operation Depending on the Substrate Used, Energies, Vol. 14, 2021, pp. 3157, <https://doi.org/10.3390/en14113157>.
- [10] L. Deng, Y. Liu, D. Zheng, L. Wang, X. Pu, L. Song, Z. Wang, Y. Lei, Z. Chen, Y. Long, Application and Development of Biogas Technology for the Treatment of Waste in China, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 70, 2017, pp. 845-851, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.265>.
- [11] M. Stanisław, D. Jacek, F. M. F. Jesus, M. Jakub, P. Patrycja, G. Łukasz, New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland, Journal of Ecological Engineering, Vol. 21, 2020, pp. 19-25, <https://doi.org/10.12911/22998993/119528>.
- [12] P. V. Dinh, N. D. Manh, T. H. Le, Effects of pH Conditions on Two-stage Anaerobic Digestion of Biodegradable organic Solid Waste, Journal of Science and Technology in Civil Engineering, Vol. 17, 2023, pp. 166-173, [https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(3V\)-13](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(3V)-13) (in Vietnamese).
- [13] L. H. Viet, L. T. N. Y, V. T. D. Nhi, N. V. C. Ngan, Study on Treatment of Biogas Effluent by High Rate *Spirulina* sp, Algae Culture Pond, Can Tho University Journal of Science, Vol. 49a, 2017, pp. 1-10, <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2017.001> (in Vietnamese).
- [14] A. Schnürer, Å. Jarvis, Microbiology of the Biogas Process, 2018, pp. 1-167.

- [15] M. J. B. Kabeyi, O. A. Olanrewaju, Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition, *Journal of Energy*, 2022, pp. 1-43, <https://doi.org/10.1155/2022/8750221>.
- [16] S. A. Saadabadi, R. E. F. Lindeboom, P. V. Aravind, A. T. Thattai, L. Fan, H. Spanjers, Solid Oxide Fuel Cells Fuelled with Biogas: Potential and constraints, *Renewable Energy*, Vol. 134, 2019, pp. 194-214, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.028>.
- [17] N. V. Anh, Research to Convert Diesel Tractor K2600 Using Biogas Fuel, *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*, Vol. 3, 2019, pp. 1371-1378 (in Vietnamese).
- [18] B. V. Ga, B. T. M. Tu, L. M. Tien, B. V. Hung, N. L. C. Thanh, Advance Ignition Angle Adjustment for Engine Fueled with Biogas-Syngas-Hydrogen in Hybrid Renewable Energy System, *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, Vol. 20, No. 3, 2022, pp. 1-6 (in Vietnamese).
- [19] N. V. Hai, N. V. Anh, Designing and Manufacturing Pressure Mass Flow Meters for Biogas Engines, *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, Vol. 126, No. 5, 2018, pp. 40-44 (in Vietnamese).
- [20] F. Legrottaglie, E. Mattarelli, C. A. Rinaldini, F. Scignoli, Application to Micro-Cogeneration of an Innovative Dual Fuel Compression Ignition Engine Running on Biogas, *International Journal of Thermofluids*, Vol. 10, 2021, pp. 100093, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100093>.
- [21] W. D. R. Wulan, U. Hamidah, A. Komarulzaman, R. T. Rosmalina, N. Sintawardani, Domestic Wastewater in Indonesia: Generation, Characteristics and Treatment, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, 2022, pp. 32397-32414, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19057-6>.
- [22] F. Cheng, Z. Dai, S. Shen, S. Wang, X. Lu, Characteristics of Rural Domestic Wastewater with Source Separation, *Water Science and Technology*, Vol. 83, No. 1, 2021, pp. 233-246, <https://doi.org/10.2166/wst.2020.557>.
- [23] B. Teichgräber, D. Schreff, C. Ekkerlein, P. A. Wilderer, SBR Technology in Germany - An Overview, *Water Science and Technology*, Vol. 43, No. 3, 2001, pp. 323-330.
- [24] V. T. Thu, V. T. M. Hanh, D. K. Uan, A Study on the Effect of Sludge Concentrations on the Efficiency of Wastewater Treatment by SBR Technology, *Petrovietnam Journal*, Vol. 8, 2014, pp. 59-63 (in Vietnamese).
- [25] N. T. H. Giang, T. T. C. Phuong, T. V. Phuoc, Efficiency of Domestic Wastewater Treatment by Biological Trickling Filter, *Hue University Journal of Science*, Vol. 127, No. 2A, 2018, pp. 43-53, <https://doi.org/10.26459/hueuni-jtt.v127i2A.4747> (in Vietnamese).
- [26] H. T. Diep, T. Q. Vinh, N. H. Dung, L. Q. Loan, V. T. T. Nhung, P. A. Vu, Impact of Salinity on COD Treatment Efficiency in the Soy Sauce Wastewater Treatment by UASB Model in Vitro, *Journal of Food Science and Technology*, Vol. 21, No. 4, 2021, pp. 57-65 (in Vietnamese).
- [27] N. M. Khai, N. D. Hien, L. T. H. Oanh, T. T. Hong, P. T. Nga, N. T. Ha, Research on Methane Generation from UASB Wastewater Treatment System at Hoa Binh Sugar Joint Stock Company, *Journal of Science and Technology*, Vol. 1, No. 4, 2015, pp. 45-49 (in Vietnamese).
- [28] V. Karthik, J. B. Isabel, S. Kavitha, J. Rajesh Banu, P. Sivashanmugam, S. Periyasamy, T. Temesgen, Wastewater to Biogas Recovery, Wastewater Treatment Plants as Biorefineries, Elsevier Publishing Company, Netherlands, Vol. 2, pp. 301-314, 2022, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90178-9.00029-9>.
- [29] L. H. Viet, V. T. Truong, N. V. C. Ngan, Study on Suitable Hydraulic Retention Time of AAO Process to Treat Effluent from Biogas Plant, *Can Tho University Journal of Science*, Vol. 56, No. 1A, 2020, pp. 49-57, <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2020.005> (in Vietnamese).
- [30] J. Laramee, S. Tilmans, J. Davis, Costs and Benefits of Biogas Recovery from Communal Anaerobic Digesters Treating Domestic Wastewater: Evidence from Peri-Urban Zambia, *Journal of Environmental Management*, Vol. 210, 2018, pp. 23-35, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.064>.
- [31] I. O. Agyeman, E. Plaza, Z. Cetecioglu, A Pilot-Scale Study of Granule-Based Anaerobic Reactors for Biogas Recovery from Municipal Wastewater under Sub-Mesophilic Conditions, *Bioresour. Technology* Vol. 337, 2021, pp. 125431, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125431>.
- [32] N. V. Thoan, Research on Sludge Pretreatment using Ultrasonic and Anaerobic Digestion of Sludge from Son Tra-Da Nang Wastewater Treatment Station Combined with Biogas Recovery, Master, Environmental Technique, Danang University of Science and Technology, 2019 (in Vietnamese).

- [33] G. Mao, H. Hu, X. Liu, J. Crittenden, N. Huang, A Bibliometric Analysis of Industrial Wastewater Treatments from 1998 to 2019, *Environmental Pollution*, Vol. 275, 2021, pp. 115785, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115785>.
- [34] N. T. T. Truc, L. V. Tuan, T. Q. Tung, Evaluation of the Ability of Some Fungal Strains to Treat Tapioca Starch Production Wastewater, *Hue University Journal of Science*, Vol. 73, No. 4, 2012, pp. 227-235 (in Vietnamese).
- [35] I. K. Kapdan, F. Kargi, Bio-Hydrogen Production from Waste Materials, *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 38, No. 5, 2006, pp. 569-582, <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.09.015>.
- [36] J. Wei, Z. Liu, X. Zhang, Biohydrogen Production from Starch Wastewater and Application in Fuel Cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 7, 2010, pp. 2949-2952, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.035>.
- [37] N. Zhang, W. Liu, Y. Peng, X. Song, Anaerobic Membrane Bioreactors for Livestock Wastewater Treatment and Resource Recovery: Opportunities and Challenges, *Current Pollution Reports*, Vol. 7, 2021, pp. 277-285, <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00192-6>.
- [38] P. N. Tuong, H. T. Trang, C. T. M. Tien, T. T. Ha, Efficiency Investigation of Livestock Wastewater after Biogas Treatment by Biofilter Technology Combined with Constructed Wetlands, *Ho Chi Minh City Open University Journal of Science - Engineering and Technology*, Vol. 15, No. 1, 2020, pp. 27-46, <https://doi.org/10.46223/hcmcoujs.tech.vi.15.1.1019.2020> (in Vietnamese).
- [39] L. T. Thoa, D. D. Truong, D. T. Nga, An Analysis of Potential and Barriers for Application of Biogas in Pig Waste Treatment in Vietnam, *Journal of Environment*, Vol. 1, 2021, pp. 78-82 (in Vietnamese).
- [40] D. Q. Trung, D. V. Huong, B. D. Cam, N. T. Nham, N. Q. Minh, C. X. Quang, Research on Anaerobic Decomposition of Pig Waste and Organic Waste in Rural Activities to Produce Methane and Organic Fertilizers, *Journal of Science and Technology*, Vol. 61, No. 1, 2018, pp. 16-20 (in Vietnamese).
- [41] P. T. T. Mai, Study on the Optimum Conditions for Anaerobic Digestion Based Biogas Production from Pineapple Leaves, *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, Vol. 62, No. 3, 2020, pp. 20-25 (in Vietnamese).
- [42] A. C. Bader, H. J. Hussein, M. T. Jabar, BOD: COD Ratio as Indicator for Wastewater and Industrial Water Pollution, *International Journal of Special Education*, Vol. 37, No. 3, 2022, pp. 1-8.
- [43] D. T. G. Huong, A Study on Swine Wastewater Treatment after Biogas Digestion using *Actinastrium* sp., *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, Vol. 16, No. 12, 2019, pp. 929-937 (in Vietnamese).
- [44] J. J. Estévez, E. V. Mercado, J. G. Jaramillo, P. Rodríguez, J. M. Herrero, H. Escalante, L. Castro, from Laboratory to Farm-Scale Psychrophilic Anaerobic Co-Digestion of Cheese Whey and Cattle Manure, *Bioresource Technology*, Vol. 19, 2022, pp. 101168, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101168>.
- [45] N. Q. Lich, V. Q. Linh, T. D. Hanh, N. Q. Huy, N. V. Khanh, L. V. Tuan, C. T. Huong, Efficiency of Integrated System using Biochar and Waste Stabilization Pond for Treatment of Effluent from Swine Manure Biogas Digester, *Hue University Journal of Science: Agriculture and Rural Development*, Vol. 130, No. 3B, 2021, pp. 119-130, <https://doi.org/10.26459/hueunijard.v130i3B.6024> (in Vietnamese).
- [46] N. T. Luong, T. T. M. Khanh, V. D. Anh, L. V. Nhat, P. M. Hen, H. T. T. Hang, Simultaneous Removal of Organic and Nitrogen Pollutants in Biogas Effluent by A2O System, the University of Danang - *Journal of Science and Technology*, Vol. 19, No. 4, 2020, pp. 43-45 (in Vietnamese).
- [47] B. T. K. Anh, N. V. Thanh, N. H. Chuyen, B. Q. Lap, Analysis and Evaluation: Applicability of the Constructed Wetland for Piggery Wastewater Treatment after Biogas Process, *Journal of Water Resources & Environmental Engineering*, Vol. 66, 2019, pp. 10-15 (in Vietnamese).
- [48] C. T. Ha, L. V. Chieu, N. V. Ha, N. T. Quan, V. N. Duy, V. T. T. Tam, Quality of Piggery Wastewater and the Role of Raw Wastewater Quality Assessment in Determining The Treatment Technology, *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, Vol. 1, No. 4, 2015, pp. 50-54 (in Vietnamese).
- [49] D. T. Hau, L. T. Thuan, T. T. A. Linh, Study on Some Pollutant Substances Treatment in Small and Medium Size of Breeding Waste Water by Zeolit Subtitles X, P1 Combined with Aluminum Oxide, *TNU Journal of Science and Technology*, Vol. 204, No. 11, 2019, pp. 85-90 (in Vietnamese).
- [50] T. V. Cuong, N. V. Huan, N. Q. Huy, N. H. Ngoc, P. T. L. Anh, H. V. Huan, The Effects of Livestock Breeding on the Quality of Surface Water in Lam Thao District, Phu Tho Province, *Journal of Forestry Science and Technology*, Vol. 1, 2015, pp. 3-9 (in Vietnamese).

- [51] T. T. Pha, D. T. H. Trang, D. T. M. Hoa, Evaluation of the Quality of Livestock Wastewater after Biogas Tank, *Journal of Science and Technology*, Vol. 166, No. 6, 2017, pp. 197-200 (in Vietnamese).
- [52] N. T. T. Ha, H. T. T. Hang, D. P. Chi, D. T. Dung, T. Q. Huy, Treatment of Domestic Wastewater and Livestock Wastewater by Algae on the Filter Material, *Journal of Agricultural Science and Technology*, Vol. 17, No. 10, 2019, pp. 826-834 (in Vietnamese).
- [53] I. Y. L. Pacheco, D. C. Nieves, C. S. Salazar, A. S. Núñez, A. A. Gallegos, D. Barceló, S. Afewerki, H. M. N. Iqbal, R. P. Saldívar, Combination of Nejayote and Swine Wastewater as A Medium for *Arthrospira Maxima* and *Chlorella Vulgaris* Production and Wastewater Treatment, *Science of The Total Environment*, Vol. 676, 2019, pp. 356-367, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.278>.
- [54] C. D. L. M. Orozco, I. J. G. Acuña, R. A. S. Terán, H. E. F. López, H. O. R. Arias, J. M. O. Rivero, Removing Organic Matter and Nutrients from Pig Farm Wastewater with a Constructed Wetland System, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 15, No. 5, 2018, pp. 2-16, <https://doi.org/10.3390/ijerph15051031>.
- [55] P. A. G. Tineo, U. D. Hinojosa, L. R. D. Mirquez, E. R. M. Escalante, P. G. Moroyoqui, R. G. U. Mercado, Performance Improvement of an Integrated Anaerobic-Aerobic Hybrid Reactor for the Treatment of Swine Wastewater, *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 34, 2020, pp. 101164, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101164>.
- [56] K. L. Aguirre, E. H. Núñez, A. G. Sánchez, R. M. Novelo, C. P. Caballero, G. G. Vallejos, A rapid and Green Method for the Determination of Veterinary Pharmaceuticals in Swine Wastewater by Fluorescence Spectrophotometry, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol. 103, 2019, pp. 610-616.
- [57] Y. Liu, S. Ma, L. Huang, S. Wang, G. Liu, H. Yang, D. Zheng, J. Cheng, Z. Xu, L. Deng, Two-Step Heating Mode with the Same Energy Consumption as Conventional Heating for Enhancing Methane Production during Anaerobic Digestion of Swine Wastewater, *Journal of Environmental Management*, Vol. 209, 2018, pp. 301-307, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.061>.
- [58] Q. Sui, C. Jiang, D. Yu, M. Chen, J. Zhang, Y. Wang, Y. Wei, Performance of a Sequencing-Batch Membrane Bioreactor (SMBR) with an Automatic Control Strategy Treating High-Strength Swine Wastewater, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 342, 2018, pp. 210-219, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.010>.
- [59] R. Zhang, M. Liao, J. Wu, X. Lu, H. Tan, J. Sun, X. P. Liao, Y. H. Liu, Metagenomic Insights into the Influence of Mobile Genetic Elements on Args Along Typical Wastewater Treatment System on Pig Farms in China, *Science of The Total Environment*, Vol. 839, 2022, pp. 156313, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156313>.
- [60] A. Reza, S. Shim, S. Kim, S. Ahn, S. Won, C. Ra, Rational Budgeting Approach as a Nutrient Management Tool for Mixed Crop-Swine Farms In Korea, *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, Vol. 33, No. 9, 2020, pp. 1520-1532, <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0640>.
- [61] J. Park, Y. Kim, B. Kim, K. Seo, Spread of Multidrug-Resistant *Escherichia Coli* Harboring Integron via Swine Farm Waste Water Treatment Plant, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 149, 2018, pp. 36-42, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.071>.
- [62] S. Shim, A. Reza, S. Kim, N. Ahmed, S. Won, C. Ra, Simultaneous Removal of Pollutants and Recovery of Nutrients from High-Strength Swine Wastewater using a Novel Integrated Treatment Process, *Animals*, Vol. 10, No. 5, 2020, pp. 835.
- [63] G. Martinelli, A. Dadomo, D. A. D. Luca, M. Mazzola, M. Lasagna, M. Pennisi, G. Pilla, E. Sacchi, P. Saccon, Nitrate Sources, Accumulation and Reduction in Groundwater from Northern Italy: Insights Provided by a Nitrate and Boron Isotopic Database, *Applied Geochemistry*, Vol. 91, 2018, pp. 23-35, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.01.011>.
- [64] S. Petrin, I. Patuzzi, A. D. Cesare, A. Tiengo, G. Sette, G. Biancotto, G. Corno, M. Drigo, C. Losasso, V. Cibin, Evaluation and Quantification of Antimicrobial Residues and Antimicrobial Resistance Genes in Two Italian Swine Farms, *Environmental Pollution*, Vol. 255, 2019, pp. 113183, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113183>.
- [65] S. Rossi, A. Pizzera, M. Bellucci, F. Marazzi, V. Mezzanotte, K. Parati, E. Ficara, Piggery Wastewater Treatment with Algae-Bacteria Consortia: Pilot-Scale Validation and Techno-Economic Evaluation at Farm Level, *Bioresour Technol*, Vol. 351, 2022, pp. 127051, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127051>.
- [66] G. Yoshida, N. Takeda, Y. Kitazono, K. Toyoda, K. Umetsu, I. Ihara, Removal of Tetracycline Antibiotics from Dairy Farm Wastewater by

- Electrocoagulation using Iron Electrodes, *Journal of Water and Environment Technology*, Vol. 18, No. 3, 2020, pp. 157-165.
- [67] Y. Takeuchi, F. J. Andriamano, S. Yasui, M. Iwasaki, T. Nishida, I. Ihara, K. Umetsu, Feasibility Study of A Centralized Biogas Plant Performance in A Dairy Farming Area, *Journal of Material Cycles and Waste Management* Vol. 20, 2018, pp. 314-322.
- [68] K. Haga, Sustainable Recycling of Livestock Wastes by Composting and Environmentally Friendly Control of Wastewater and Odors, *Journal of Environmental Science and Engineering*, Vol. 10, 2021, pp. 163-178, <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2021.05.001>.
- [69] D. F. Shams, N. Singhal, P. Elefsiniotis, Effect of Feed Characteristics and Operational Conditions on Treatment of Dairy Farm Wastewater in A Coupled Anoxic-Upflow and Aerobic System, *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 133, 2018, pp. 186-195.
- [70] M. H. Cantillo, M. Lay, P. Kovalsky, Anaerobic Digestion of Dairy Effluent in New Zealand, Time to Revisit the Idea?, *Energies*, Vol. 16, No. 6, 2023, pp. 2859, <https://doi.org/10.3390/en16062859>.
- [71] S. Sivaprakasam, K. Balaji, A Review of Upflow Anaerobic Sludge Fixed Film (UASFF) Reactor for Treatment of Dairy Wastewater, *Materials Today: Proceedings*, 2021, pp. 1879-1883, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.822>.
- [72] M. N. Tahir, R. Riaz, M. Bial, H. M. Nouman, Current Standing and Future Challenges of Dairying in Parkistan: A Status Update, Vol. 1, 2019, pp. 1-25, <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73442>.
- [73] A. G. Capodaglio, Integrated, Decentralized Wastewater Management for Resource Recovery in Rural and Peri-Urban Areas, *Resources*, Vol. 6, No. 2, pp. 1-20, 2017, <https://doi.org/10.3390/resources6020022>.
- [74] S. Verm, A. Daverey, A. Sharma, Slow Sand Filtration for Water and Wastewater Treatment – A Review, *Environmental Technology Reviews*, Vol. 6, No. 1, 2017, pp. 47-58, <https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1278278>.
- [75] Y. Zhang, M. Yang, X. Huang, Arsenic (V) Removal with A Ce (IV)-Doped Iron Oxide Adsorbent, *Chemosphere*, Vol. 51, No. 9, 2003, pp. 945-952, [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00850-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00850-0).
- [76] N. X. Cuong, N. T. Loan, Domestic Wastewater Treatment Efficiency of Integrated Artificial Wetland System, *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, Vol. 32, No. 1, 2016, pp. 10-17 (in Vietnamese).
- [77] L. H. Viet, N. V. C. Ngan, Effect of Hydraulic Retention Time on Domestic Wastewater Treatment Efficiency by the Moving Bed Biofilm Reactor and Handmade Membrane Bioreactor, *Can Tho University Journal of Science*, Vol. 59, No. 2, 2023, pp. 17-26, <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2023.060> (in Vietnamese).
- [78] K. Lavane, N. T. C. Ngan, N. T. T. Le, D. T. C. Thu, T. N. N. Minh, Reusing Beehive Charcoal Combustion Residue as Biofilter Media for Treatment of Household Domestic Wastewater, *HUAF Journal of Agricultural Science & Technology*, Vol. 2, No. 2, 2018, pp. 693-704, <https://doi.org/10.46826/huaf-jasat.v2n2y2018.155>.
- [79] K. Lavane, N. T. Thanh, P. V. Toan, Reusing Plastic Straws as Carrier in A Submerged Biofilter to Treat Domestic Wastewater, *Can Tho University Journal of Science*, Vol. 57, 2021, pp. 121-129, <https://doi.org/10.22144/ctu.jsci.2021.035>.
- [80] C. M. Manaia, J. Rocha, N. Scaccia, R. Marano, E. Radu, F. Biancullo, F. Cerqueira, G. Fortunato, I. C. Iakovides, I. Zammit, I. Kampouris, I. V. Moreira, O. C. Nunes, Antibiotic Resistance in Wastewater Treatment Plants: Tackling the Black Box, *Environment International*, Vol. 115, 2018, pp. 312-324, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.044>.
- [81] X. Wang, X. Zhou, S. Ma, Z. Wang, E. Wang, Z. Li, White Carbon Black Wastewater Treatment by Electrodialysis: Salt Separation, Silicon Sol Transporting and Wastewater Recycling, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 10, No. 3, 2022, pp. 107856, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107856>.
- [82] W. D. R. Wulan, U. Hamidah, A. Komarulzaman, R. T. Rosmalina, N. Sintawardani, Domestic Wastewater in Indonesia: Generation, Characteristics and Treatment, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, 2022, pp. 32397-32414, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19057-6>.
- [83] M. Besson, S. Berger, L. T. Barna, E. Paul, M. Spérandio, Environmental Assessment of Urine, Black and Grey Water Separation for Resource Recovery in A New District Compared to Centralized Wastewater Resources Recovery Plant, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 301, 2021, pp. 126868, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126868>.
- [84] A. A. Inyinbor, O. S. Bello, A. P. Oluyori, H. E. Inyinbor, A. E. Fadiji, Wastewater Conservation

- and Reuse in Quality Vegetable Cultivation: Overview, Challenges and Future Prospects, *Food Control*, Vol. 98, 2019, pp. 489-500, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.12.008>.
- [85] J. Liu, L. Liu, Z. Huang, Y. Fu, Z. Huang, Contaminant Removal and Optimal Operation of Bio-Slow Sand Filtration Water Treatment Based on Nature-Based Solutions, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 29, No. 2, 2020, pp. 1703-1713, <https://doi.org/10.15244/pjoes/109728>.
- [86] K. Abdiyev, S. Azat, E. Kuldeyev, D. Ybyraiymkul, S. Kabdrakhmanova, R. Berndtsson, Review of Slow Sand Filtration for Raw Water Treatment with Potential Application in Less-Developed Countries, *Water*, Vol. 15, No. 11, 2023, pp. 2007, <https://doi.org/10.3390/w15112007>.
- [87] P. C. L. Lehto, J. T. Pulkkinen, T. Kiuru, J. Koskela, J. Vielma, Efficient Water Treatment Achieved in Recirculating Aquaculture System using Woodchip Denitrification and Slow Sand Filtration, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28, 2021, pp. 65333-65348.
- [88] N. X. Hoang, L. H. Viet, Treatment of Dye-Baths from Textile Industry by Nano-Filtration, *Can Tho University Journal of Science*, Vol. 23b, 2012, pp. 272-283 (in Vietnamese).
- [89] S. M. Abdelbasi, A. E. Shalan, An Overview of Nanomaterials for Industrial Wastewater Treatment, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 36, 2019, pp. 1209-1225.
- [90] H. V. Hung, V. H. Tap, L. T. Cuc, N. Hoang, N. T. N. Ha, A Mini Review on the Application of Ozone Technology to Treat Textile Dyeing Wastewater, *TNU Journal of Science and Technology*, Vol. 228, No. 6, 2023, pp. 49-60, 2023, <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7668> (in Vietnamese).
- [91] N. T. H. Tham, D. V. Thuan, T. B. Thuy, Synthesizing and Evaluating Adsorption Kinetics of Removing Congo Red Dyes Onto Exfoliated Graphite, *Journal of Science and Technology - Nguyen Tat Thanh University*, Vol. 3, No. 2, 2020, pp. 1-4, <https://doi.org/10.55401/jst.v3i2.126> (in Vietnamese).
- [92] D. S. Duc, V. T. Mai, D. T. P. Lan, Color Treatment of Paper Waste Water With Fenton React, *Science and Technology Development Journal*, Vol. 12, No. 5, 2009, pp. 37-45 (in Vietnamese).
- [93] N. Q. Quyen, V. D. Thao, D. T. T. Linh, Research on Wastewater Treatment from the Paper Production by Flocculation in Combination with Advanced Oxidation, *Journal of Science and Technique - Le Quy Don Technical University*, Vol. 13, No. 4, 2018, pp. 3-10 (in Vietnamese).
- [94] N. M. Khoi, N. H. Cuong, L. N. Sinh, Technology of Mimosa and Thps Combination Tanning is A Method of Tanning Environmentally Friendly, *Scientific Journal of Hanoi Metropolitan University*, Vol. 2, 2016, pp. 107-115 (in Vietnamese).
- [95] N. T. T. My, T. M. Nhut, L. T. Hieu, P. T. Tot, B. X. Thanh, Assessment of Taking Water Treatment Capacity by MBR Technology Combined Mobile Cards, *Basic Research in Earth and Environmental Sciences: Proceedings, HCM City, 2019*, pp. 508-510, <https://doi.org/10.15625/vap.2019.000191> (in Vietnamese).
- [96] R. T. Mamińska, Limits and Perspectives of Pulp and Paper Industry Wastewater Treatment – A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 78, 2017, pp. 764-772, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.021>.
- [97] M. A. Hubbe, J. R. Metts, D. Hermosilla, M. A. Blanco, L. Yerushalmi, F. Haghghat, P. L. Lehto, Z. Khodaparast, M. Kamali, A. Elliott, Wastewater Treatment and Reclamation: A Review of Pulp and Paper Industry Practices and Opportunities, *BioResources*, Vol. 11, No. 3, 2016, pp. 7953-8091.
- [98] J. Tang, Y. Pu, T. Zeng, Y. Hu, J. Huang, S. Pan, X. Wang, Y. Li, A. Abomohra, Enhanced Methane Production Coupled with Livestock Wastewater Treatment using Anaerobic Membrane Bioreactor: Performance and Membrane Filtration Properties, *Bioresource Technology*, Vol. 345, 2022, pp. 126470, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126470>.
- [99] M. A. Musa, S. I. Idrus, C. M. Hasfalina, N. N. N. Daud, Effect of Organic Loading Rate on Anaerobic Digestion Performance of Mesophilic (UASB) Reactor Using Cattle Slaughterhouse Wastewater as Substrate, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 15, No. 10, 2018, pp. 2220, <https://doi.org/10.3390/ijerph15102220>.
- [100] N. Norouzi, H. Khajepour, Simulation of Methane Gas Production Process from Animal Waste in a Discontinuous Bioreactor, *Biointerface Research in Applied Chemistry*, Vol. 11, No. 6, 2018, pp. 13850-13859, <https://doi.org/10.33263/BRIAC116.1385013859>.
- [101] P. Latifi, M. Karrabi, S. Danesh, Anaerobic Co-Digestion of Poultry Slaughterhouse Wastes with Sewage Sludge in Batch-Mode Bioreactors (Effect of Inoculum-Substrate Ratio and Total Solids), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 107, 2019, pp. 288-296, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.015>.

- [102] A. Noyola, J. M. M. Sagastume, J. E. L. Hernandez, Treatment of Biogas Produced in Anaerobic Reactors for Domestic Wastewater: Odor Control and Energy/Resource Recovery, *Environmental Science and Biotechnology*, Vol. 5, 2006, pp. 93-114.
- [103] A. Sánchez, L. R. Hernández, D. Buntner, A. L. E. García, I. Tejero, J. M. Garrido, Denitrification Coupled with Methane Oxidation in A Membrane Bioreactor after Methanogenic Pre-Treatment of Wastewater, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol. 91, No. 12, 2016, pp. 2950-2958, <https://doi.org/10.1002/jctb.4913>.
- [104] L. Alibardi, N. Bernava, R. Cossu, A. Spagni, Anaerobic Dynamic Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment at Ambient Temperature, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 284, 2016, pp. 130-138, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.111>.
- [105] E. Vaez, H. Zilouei, Towards the Development of Biofuel Production from Paper Mill Effluent, *Renewable Energy*, Vol. 146, 2020, pp. 1408-1415, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.059>.
- [106] T. Schmidt, P. Harris, S. Lee, B. K. M. Cabe, Investigating the Impact of Seasonal Temperature Variation on Biogas Production from Covered Anaerobic Lagoons Treating Slaughterhouse Wastewater using Lab Scale Studies, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 7, No. 3, 2019, pp. 103077, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103077>.
- [107] D. Thanos, A. Maragkaki, D. Venieri, M. Fountoulakis, T. Manios, Enhanced Biogas Production in Pilot Digesters Treating A Mixture of Olive Mill Wastewater and Agro-Industrial or Agro-Livestock By-Products in Greece, *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 12, 2021, pp. 135-143.
- [108] J. Ji, J. Ni, A. Ohtsu, N. Isozumi, Y. Hu, R. Du, Y. Chen, Y. Qin, K. Kubota, Y. Y. Li, Important Effects of Temperature on Treating Real Municipal Wastewater by A Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor: Removal Efficiency, Biogas, and Microbial Community, *Bioresource Technology*, Vol. 336, 2021, pp. 125306, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125306>.
- [109] S. P. Lohani, S. Wang, W. H. Bergland, S. N. Khanal, R. Bakke, Modeling Temperature Effects in Anaerobic Digestion of Domestic Wastewater, *Water-Energy Nexus*, Vol. 1, No. 1, 2018, pp. 56-60, <https://doi.org/10.1016/j.wen.2018.07.001>.
- [110] C. Rattanapan, L. Sinchai, T. T. Suksaroj, D. Kantachote, W. Ounsaneha, Biogas Production by Co-Digestion of Canteen Food Waste and Domestic Wastewater under Organic Loading Rate and Temperature Optimization, *Environments*, Vol. 6, No. 2, 2019, pp. 16, <https://doi.org/10.3390/environments6020016>.
- [111] L. Sanchez, M. Carrier, J. Cartier, C. Charmette, M. Heran, J. Steyer, G. Lesage, Enhanced Organic Degradation and Biogas Production of Domestic Wastewater at Psychrophilic Temperature Through Submerged Granular Anaerobic Membrane Bioreactor for Energy-Positive Treatment, *Bioresource Technology*, Vol. 353, 2022, pp. 127145, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127145>.
- [112] S. Yossan, S. O Thong, P. Prasertsan, Effect of Initial pH, Nutrients and Temperature on Hydrogen Production From Palm Oil Mill Effluent using Thermotolerant Consortia and Corresponding Microbial Communities, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 18, 2012, pp. 13806-13814, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.151>.
- [113] M. M. Arimi, J. Knodel, A. Kiprop, S. S. Namango, Y. Zhang, S. U. Geißen, Strategies for Improvement of Biohydrogen Production from Organic-Rich Wastewater: A Review, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 75, 2015, pp. 101-118, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.02.011>.
- [114] O. Bakari, K. N. Njau, C. Noubactep, Effects of Zero-Valent Iron on Sludge and Methane Production in Anaerobic Digestion of Domestic Wastewater, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, Vol. 8, 2023, pp. 100377, <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100377>.
- [115] K. Fackaew, C. Polprasert, Air Stripping Pre-Treatment Process to Enhance Biogas Production in Anaerobic Digestion of Chicken Manure Wastewater, *Bioresource Technology Reports*, Vol. 14, 2021, pp. 100647, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100647>.
- [116] M. K. Daud, H. Rizvi, M. F. Akram, S. Ali, M. Rizwan, M. Nafees, Z. S. Jin, Review of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Technology: Effect of Different Parameters and Developments for Domestic Wastewater Treatment, *Journal of Chemistry*, 2018, pp. 1-13, <https://doi.org/10.1155/2018/1596319>.
- [117] T. S. Nam, L. T. M. Kha, H. V. Khanh, H. V. Thao, N. V. C. Ngan, N. H. Chiem, The Possibility of Producing Biogas from Rice Straw and Water Hyacinth at Different VS's Concentration in Batch Anaerobic Experiment, *Can Tho University Journal of Science*, No. 1, 2017, pp. 93-99, <https://doi.org/10.22144/ctu.jsi.2017.035> (in Vietnamese).

- [118] M. U. Khan, B. K. Ahring, Lignin Degradation under Anaerobic Digestion: Influence of Lignin Modifications - A Review, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 128, 2019, pp. 105325, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105325>.
- [119] M. Dębowski, S. Szewaja, M. Zieliński, M. Kisielewska, E. S. Mazanek, The Influence of Anaerobic Digestion Effluents (Ades) used as The Nutrient Sources for *Chlorella Sp.*, Cultivation on Fermentative Biogas Production, *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 8, 2017, pp. 1153-1161.
- [120] S. A. Tamar, A. P. M. I. Umer, Stabilization of Sludge in Zakho Municipal Wastewater by Anaerobic Digestion for Biogas Production in Kurdistan Region, Iraq, *Science Journal of University of Zakho*, Vol. 10, No. 3, 2022, pp. 86-92, <https://doi.org/10.25271/sjuoz.2022.10.3.924>.
- [121] G. Li, J. Zhang, H. Li, R. Hu, X. Yao, Y. Liu, Y. Zhou, T. Lyu, Towards High-Quality Biodiesel Production from Microalgae Using Original and Anaerobically-Digested Livestock Wastewater, *Chemosphere*, Vol. 273, 2021, pp. 128578, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128578>.
- [122] S. U. Demirel, B. Taskin, G. N. Demirel, M. Duran, The Effect of Managing Nutrients in the Performance of Anaerobic Digesters of Municipal Wastewater Treatment Plants, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 97, 2013, pp. 7899-7907.
- [123] M. Hjorth, A. M. Nielsen, T. Nyord, M. N. Hansen, P. Nissen, S. G. Sommer, Nutrient Value, Odour Emission and Energy Production of Manure as Influenced by Anaerobic Digestion and Separation, *Agronomy for Sustainable*, Vol. 29, 2009, pp. 329-338.
- [124] A. H. Slade, G. J. S. Thorn, M. A. Dennis, The Relationship between BOD:N Ratio and Wastewater Treatability in A Nitrogen-Fixing Wastewater Treatment System, *Water Science and Technology*, Vol. 63, 2011, pp. 627-632, <https://doi.org/10.2166/wst.2011.215>.
- [125] A. Matilainen, M. Vepsäläinen, M. Sillanpää, Natural Organic Matter Removal by Coagulation during Drinking Water Treatment: A Review, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 159, No. 2, 2010, pp. 189-197, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.007>.
- [126] A. Balakrishnan, S. B. K. Kanchinadham, C. Kalyanaraman, Nutrient Requirement of Tannery Wastewater Containing Tannins, *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 23, 2023, pp. 101776, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101776>.
- [127] T. Jinjaruk, K. Chunkao, K. Pongput, C. Choeihom, T. Pattamapitoon, W. Wararam, S. Thaipakdee, M. Srichomphu, P. Maskulrath, HDPE Pipeline Length for Conditioning Anaerobic Process to Decrease BOD in Municipal Wastewater, *EnvironmentAsia*, Vol. 11, 2018, No. 1, pp. 31-44, <https://doi.org/10.14456/ea.2018.3>.
- [128] A. Ahmad, Effect of Ozonation on Biodegradation and Methanogenesis of Palm Oil Mill Effluent Treatment for The Production of Biogas, *Science and Engineering*, Vol. 41, No. 5, 2019, pp. 427-436, <https://doi.org/10.1080/01919512.2019.1565987>.
- [129] G. Wei, T. Wei, Z. Li, C. Wei, Q. Kong, X. Guan, G. Qiu, Y. Hu, C. Wei, S. Zhu, Y. Liu, S. Preis, BOD/COD ratio as A Probing Index in the O/H/O Process for Coking Wastewater Treatment, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 466, 2023, pp. 143257, <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2023.143257>.
- [130] S. M. Beyan, S. V. Prabhu, T. T. Sissay, A. A. Getahun, Sugarcane Bagasse Based Activated Carbon Preparation and its Adsorption Efficacy on Removal of BOD and COD from Textile Effluents: RSM Based Modeling, Optimization and Kinetic Aspects, *Bioresource Technology Reports*, Vol. 14, 2021, pp. 100664, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100664>.
- [131] Y. Long, Y. Fang, D. Shen, H. Feng, T. Chen, Hydrogen Sulfide (H₂S) Emission Control by Aerobic Sulfate Reduction in Landfill, *Scientific Reports*, Vol. 6, 2016, pp. 38103.
- [132] P. G. Ranjith, X. Zhang, Experimental Investigation of Effects of CO₂ Injection on Enhanced Methane Recovery in Coal Seam Reservoirs, *Journal of CO₂ Utilization*, Vol. 33, 2019, pp. 394-404, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.06.019>.
- [133] N. T. Phu, Research on Anaerobic Biodegradation of Septic Tank Sludge, Residual Activated Sludge and Rich Organic Waste to Generate Methane, Master Thesis, Vietnam National University, Hanoi, 2020 (in Vietnamese).
- [134] J. Kim, J. Kim, C. Lee, Anaerobic Co-Digestion of Food Waste, Human Feces, and Toilet Paper: Methane Potential and Synergistic Effect, *Fuel*, Vol. 248, pp. 189-195, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.081>.
- [135] S. S. Tupsakhare, M. J. Castaldi, Efficiency Enhancements in Methane Recovery from Natural Gas Hydrates using Injection of CO₂/N₂ Gas Mixture Simulating In-Situ Combustion, *Applied*

- Energy, Vol. 236, 2019, pp. 825-836,
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.023>.
- [136] A. Tawfik, M. E. Qelish, Key Factors Affecting on Bio-Hydrogen Production from Co-Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Kitchen Wastewater, *Bioresource Technology*, Vol. 168, 2014, pp. 106-111,
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.127>.
- [137] L. Wang, L. Singh, H. Liu, Revealing The Impact of Hydrogen Productionconsumption Loop Against Efficient Hydrogen Recovery in Single Chamber Microbial Electrolysis Cells (MECs), *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 29, 2018, pp. 13064-13071,
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.081>.
- [138] G. Moral, R. O. Imedio, D. G. Alfredo Ortiz, I. Ortiz, Hydrogen Recovery from Coke Oven Gas. Comparative Analysis of Technical Alternatives, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 61, No. 18, 2022, pp. 6065-6234,
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04668>.
- [139] R. Abejón, A. F. Ríos, A. D. Ramos, J. Laso, I. R. Salmón, M. Yáñez, A. Ortiz, D. Gorri, N. Donzel, D. Jones, A. Irabien, I. Ortiz, R. Aldaco, M. Margallo, Hydrogen Recovery from Waste Gas Streams to Feed (High-Temperature PEM) Fuel Cells: Environmental Performance under a Life-Cycle Thinking Approach, *Applied Science*, Vol. 10, No. 21, 2020, pp. 7461,
<https://doi.org/10.3390/app10217461>.
- [140] S. Cho, M. Lee, W. Lee, Y. Ahn, Improved Hydrogen Recovery in Microbial Electrolysis Cells Using Intermittent Energy Input, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 4, 2018, pp. 1-5,
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.025>.
- [141] D. Lianga, L. Zhang, W. Hea, C. Lia, J. Liua, S. Liuc, H. S. Lee, Y. Feng, Efficient Hydrogen Recovery with Cop-NF as Cathode in Microbial Electrolysis Cells, *Applied Energy*, Vol. 264, 2020, pp. 114700,
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114700>.